

渤海湾盆地渤中凹陷西南洼古近系东营组超压分布特征及成因

杨小艺^{1,2}, 刘成林^{1,2}, 王飞龙³, 李国雄^{1,2}, 冯德浩^{1,2}, 杨韬政^{1,2}, 何志斌^{1,2}, 苏加佳^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452]

摘要:渤海湾盆地渤中凹陷西南洼古近系东营组超压广泛发育, 但压力分布特征、超压形成机理及其对油气成藏的影响尚未完全明确。基于实测地层压力和测井资料, 对渤中凹陷西南洼地区东营组现今地层压力进行研究, 分析现今地层压力空间分布特征, 并通过测井曲线综合分析及声波速度-密度交会图法分析超压成因类型, 根据盆地模拟技术恢复成藏时期古压力演化, 研究地层古压力对油气成藏的影响。研究表明:①东营组纵向上发育一套完整的超压系统, 平面上超压围绕生烃洼陷分布, 越靠近凹陷中心超压越大。②超压由浅层欠压实主导型转化为深层欠压实-生烃膨胀复合型。③东营组三段和东营组二段下亚段烃源岩层内发育的超压不仅为油气运移提供充足动力, 同时向下形成超压流体封盖, 阻止油气向上逸散。最后提出古潜山是渤中凹陷西南洼下一步深层和超深层油气勘探的有利目标。

关键词:超压成因; 异常高压; 油气成藏; 东营组; 古近系; 渤中凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Distribution and origin of overpressure in the Paleogene Dongying Formation in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

YANG Xiaoyi^{1,2}, LIU Chenglin^{1,2}, WANG Feilong³, LI Guoxiong^{1,2}, FENG Dehao^{1,2}, YANG Taozheng^{1,2}, HE Zhibin^{1,2}, SU Jiajia^{1,2}

[1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300452, China]

Abstract: Overpressure is extensively distributed in the Paleogene Dongying Formation in the southwestern sub-sag of the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. However, there is a lack of a clear understanding of the pressure distribution, the formation mechanisms of overpressure, and the effects of overpressure on hydrocarbon accumulation in this formation. In this study, we explore the present-day pressure in the formation and its spatial distribution using measured formation pressure and logs. Based on a comprehensive analysis of log curves and the cross plots of sonic velocity vs. density, we analyze the genetic types of overpressure in the formation. Furthermore, through basin modeling, we reconstruct the paleopressure evolution during hydrocarbon accumulation to assess the effects of the formation paleopressure on hydrocarbon accumulation. Key findings are as follows: (1) The Dongying Formation exhibits a complete overpressure system vertically. Horizontally, the overpressure is distributed around hydrocarbon-generating sub-sags, intensifying closer to the sag center; (2) The genetic type of overpressure shifts from predominant undercompaction in shallow strata to a combination of undercompaction and hydrocarbon generation-induced expansion in deep layers; (3) The overpressure within the source rocks of the Dongying Formation, including the 3rd member and the lower sub-member of the 2nd member, offers a sufficient dynamic for hydrocarbon migration. Furthermore, it forms

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2024-01-01。

第一作者简介: 杨小艺(2000—), 女, 硕士研究生, 石油与天然气地质。E-mail: yangxy159908@126.com。

通信作者简介: 刘成林(1970—), 男, 教授、博士生导师, 油气地球化学与资源评价、非常规油气地质。E-mail: liucl@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872127); 国家重点研发计划项目(2021YFA071900)。

seals for the underlying overpressured fluids, preventing the upward escape of hydrocarbons. It is proposed that ancient buried hills represent favorable targets for future deep and ultra-deep hydrocarbon exploration in the southeastern sub-sag of the Bozhong Sag.

Key words: origin of overpressure, anomalously high pressure, hydrocarbon accumulation, Dongying Formation, Paleogene, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:杨小艺,刘成林,王飞龙,等. 渤海湾盆地渤中凹陷西南洼古近系东营组超压分布特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 96–112. DOI:10. 11743/ogg20240107.

YANG Xiaoyi, LIU Chenglin, WANG Feilong, et al. Distribution and origin of overpressure in the Paleogene Dongying Formation in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 96–112. DOI:10. 11743/ogg20240107.

异常高压现象在全球含油气盆地中具有普遍性,中国多数含油气盆地都广泛发育超压体系,渤海湾盆地也是其中之一^[1-2]。异常高压不但对钻井安全有一定影响,而且与有机质生烃演化、油气运移聚集及成藏密切相关,一直是油气地质与勘探领域研究的热点问题^[3-4]。渤海湾盆地是中国东部重要的含油气盆地^[5],以古近系东营组和沙河街组为主的生油层系内部发育不同程度的超压体系^[6-7]。渤中凹陷是渤海海域的沉积中心,油气资源丰富,具有良好勘探前景。近年来,围绕渤中凹陷油气勘探不断取得突破,在凹陷西南部发现了渤中19-6和渤中13-2等大型油气田^[8-11],深入理解超压对渤中凹陷油气成藏的影响将具有重要意义。

超压的成因机制分类方案较多,Bowers^[12]提出的主流分类为欠压实、流体膨胀、侧向传递和构造加载4类。赵靖舟^[13]等在2017年提出的超压成因机制最新分类方案中,将其分为不均衡压实、流体膨胀、成岩作用、构造挤压和压力传递5类,其中流体膨胀作用又可细分为生烃作用、水热膨胀等。许多学者认为欠压实和生烃作用是非挤压型含油气盆地形成大规模超压的主要机制^[14-17]。欠压实作用曾被认为是渤海湾盆地古近系大规模超压形成的首要原因^[2],但郝芳等^[18]研究认为渤中凹陷区较强的超压是由压实不均衡和生烃作用共同作用而形成。蒋有录等^[2]指出渤海湾盆地古近系超压成因机制受有机质热演化程度影响,生烃层系未进入生油门限前以欠压实成因为主,随有机质热演化程度增加,超压成因逐渐由欠压实作用转变为生烃作用。沈章洪^[7]认为渤中凹陷发育4类超压,分别为单纯欠压实型、欠压实主导型、生烃主导型和流体传导型,且随地层由新变老,地层超压类型由单纯欠压实型为主逐渐向生烃主导型为主过渡。但以往主要针对沙河街组超压成因进行研究,东营组超压成因有待深入研究。

综上所述,渤中凹陷西南洼东营组沉积巨厚泥岩,

广泛发育异常压力,但其地层压力分布特征及超压形成机理仍不明确,限制了超压对油气成藏影响的研究。利用研究区钻井、录井、测井及地层测试资料准确预测东营组压力,划分其垂向超压带,并通过测井曲线综合分析及声波速度-密度交会图法有效识别超压成因和类型,应用盆地模拟技术恢复研究区古压力演化特征,进而探究超压对油气成藏的影响,为预测渤中凹陷西南洼油气有利聚集区提供参考。

1 区域地质概况

渤中凹陷位于渤海湾盆地中东部,是古近纪以来渤海海域的沉降中心,面积约8 500 km²,是油气资源丰富集的有利区域^[19-20]。研究区位于渤中凹陷西南部,紧邻渤中凹陷主洼,周缘被沙垒田凸起、埕北低凸起和渤南凸起所围绕(图1a)。研究区发育有太古宇、中生界和新生界,受构造抬升作用影响,太古宇变质岩基底和中生界沉积岩体遭受不同程度风化剥蚀,残留厚度差异较大^[21]。研究区新生界自下而上依次沉积孔店组(E_2k)、沙河街组(E_2s)、东营组(E_3d)、馆陶组(N_1g)、明化镇组(N_2m)及平原组(Qp)。其中,超压主要发育层系为东营组和沙河街组,本次研究的目标层系为东营组。孔店组在研究区沉积范围有限,岩性以杂色或红色巨厚砂砾岩为主;沙河街组为渤中凹陷重要生烃层系,岩性主要为半深湖-深湖相暗色泥岩,局部与粉砂质泥岩、粉砂岩等互层^[22-23]。东营组从下到上可分为东三段(E_3d^3)、东二段(E_3d^2)和东一段(E_3d^1),考虑东二段内部存在明显的岩性变化,将其细分为东二段上亚段(E_3d^{2u})和东二段下亚段(E_3d^{2l}),东三段岩性以半深湖-深湖相暗色泥岩为主,东二段发育三角洲相砂岩-泥岩不等厚互层,东一段岩性则以含砾砂岩为主。馆陶组和明化镇组以砂砾岩沉积为主,是研究区主力储层之一^[24]。受不同时期差异性沉积的影响,渤中凹陷形成了3套储-盖组合,分别是古

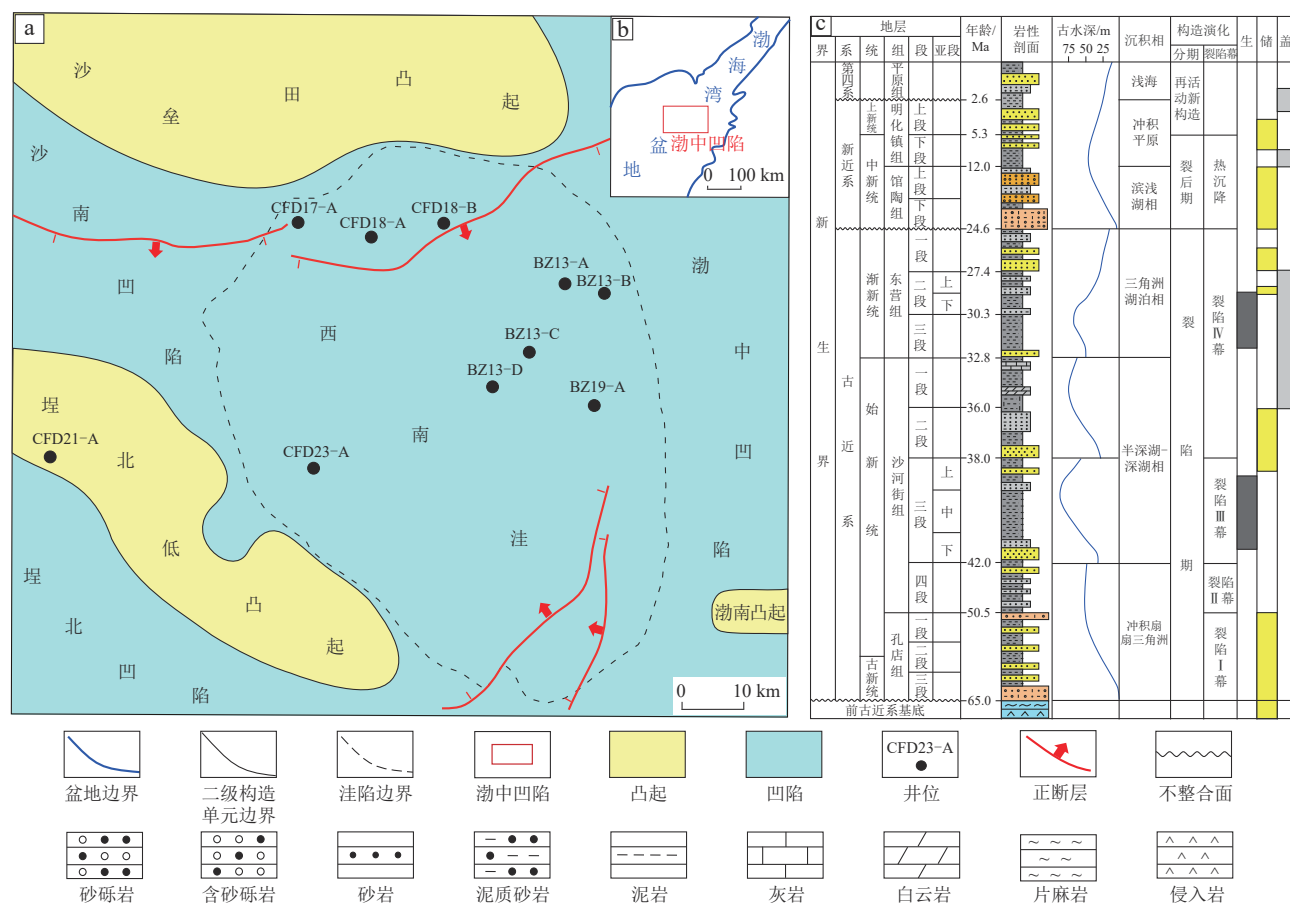


图1 渤中凹陷西南洼区域地质概况图及地层综合柱状图

Fig. 1 Regional geological sketch map (a) and composite stratigraphic column (b) of the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

a. 渤中凹陷西南洼构造; b. 渤中凹陷地理位置; c. 地层综合柱状图

潜山上生下储、古近系源内自生自储及新近系源外下生上储(图1c)^[25-26]。

渤中凹陷自新生代沉积以来,经历了裂陷期和裂后期等构造演化阶段,形成相对独立的伸展断裂和走滑断裂,有利于圈闭形成和油气聚集成藏^[27-28]。研究区在裂陷期发生多幕裂陷^[29],可分为裂陷I幕—裂陷IV幕:孔店组—沙四段沉积期为裂陷I幕(65.0~42.0 Ma),处于裂陷早期,是新生代地层沉积和构造演化的开端,发育大小不一、互不连通的湖盆;沙三段沉积期为裂陷II幕(42.0~38.0 Ma),裂陷活动加剧,分散的湖盆串通联合形成大型湖盆;沙二段—沙一段沉积期为裂陷III幕(38.0~32.8 Ma),构造挤压作用相对减弱,以区域性沉降为主,湖盆面积扩大;东三段—东一段沉积期为裂陷IV幕(32.8~24.6 Ma),湖盆范围缩小,沉降速率加快,构造抬升作用不断增强,整体发生强烈隆升剥蚀,东营组与馆陶组在全区范围内形成不整合接触^[30-31]。渐新世末期裂陷作用基本结束,随后进入裂后热沉降阶段并持续至今,馆陶组—明化镇组下段沉积期(24.6~5.3 Ma)断裂活动较弱,明化镇组

上段—第四系沉积期(5.3 Ma至今)则多次发生强烈的新构造运动^[32](图1c)。

2 现今地层压力预测

钻杆地层测试(DST)实测压力可以提供地下流体压力信息,能直接反映测试层段的地层压力状态^[33]。研究区东营组广泛发育超压,实测地层压力系数为0.98~1.67,纵向上表现为常压—超压结构,东一段为常压,东二段和东三段为超压。由于受东营组实测地层压力数据较少的限制,难以确定地层压力在纵向上和平面上的分布特征,因此需要选取合适的方法对研究区地层压力进行较为全面的预测。本文在研究区实测地层压力的基础上,综合利用测井、钻井及录井等资料,采用等效深度法和伊顿法对研究区现今地层压力展开预测。

2.1 等效深度法

等效深度法即平衡深度法,是一种基于孔隙度的

地层压力预测方法^[34]。该方法认为,在泥岩沉积层段中,分别处于正常压实曲线和异常压实曲线上,但声波时差相同的两点具有相同的孔隙度,其对应的有效应力也相同^[35]。假设B点位于正常压实段,A点位于欠压实段,则其具有以下关系:

$$\sigma_A = \sigma_B \quad (1)$$

$$\sigma_A = p_A - p_{fA} \quad (2)$$

$$\sigma_B = p_B - p_{fB} \quad (3)$$

$$p_{fA} = p_A - p_B + p_{fB} = g\rho_A h_A - g(\rho_B - \rho_A)h_B \quad (4)$$

式中: σ_A 和 σ_B 分别为A,B两点处有效应力,MPa; p_A 和 p_B 分别为A,B两点处上覆地层压力,MPa; p_{fA} 和 p_{fB} 分别为A,B两点处孔隙流体压力,MPa; ρ_A 和 ρ_B 分别为A,B两点处上覆地层平均密度,g/cm³; h_A 为A点的埋藏深度,m; h_B 为A点对应的等效深度,m。

采用等效深度法预测现今地层压力,需要求取正常压实曲线和等效深度,主要以下包括3个步骤。

①根据实测地层压力确定正常压实段,筛选出厚度大于2 m的泥岩作泥岩声波时差-深度交会图,通过拟合二者的指数关系建立正常压实曲线,进而求取A点的等效深度 h_B :

$$\Delta t \approx \Delta t_0 e^{-c \times h_B} \quad (5)$$

$$h_B = (\ln \Delta t_0 - \ln \Delta t) / c \quad (6)$$

式中: Δt 表示A点处声波时差,μs/m; Δt_0 表示地表处声波时差,μs/m; c 为岩石性质参数,无量纲。

②拟合该井泥岩密度与深度的线性关系,得出泥岩密度趋势线,进而求取 ρ_A 和 ρ_B 。

③联立公式(4)和公式(6)得出A点的 p_{fA} 计算公式为:

$$p_{fA} = g\rho_A h_A - g(\rho_B - \rho_A) [(\ln \Delta t_0 - \ln \Delta t) / c] \quad (7)$$

以研究区CFD18-A井为例,使用等效深度法计算现今地层压力。首先筛选出浅层明化镇组和馆陶组泥岩声波时差资料,拟合泥岩点声波时差与深度的指数关系,建立正常压实趋势线方程:

$$y_1 = 517.55e^{-0.0002x} \quad (8)$$

随后拟合密度与深度的线性关系:

$$y_2 = 0.0002x + 1.7844 \quad (9)$$

式中:横坐标 x 为埋藏深度,m;纵坐标 y_1 为该深度对应的声波时差,μs/m;纵坐标 y_2 为该深度对应的密度,g/cm³。由公式(8)可知 $\Delta t_0 = 517.55$, $c = 0.0002$,据公式(9)可求出不同深度与对应有有效深度的密度,进而求取地层孔隙流体压力。

岩石中分散的固体有机质声波时差接近

550 μs/m^[36],而沉积岩的岩石骨架声波时差仅为150~200 μs/m,高有机碳含量对岩石整体的声波时差测量产生了显著影响^[37],因此需要对高有机碳含量泥岩段声波时差进行有机质含量校正。研究区东二段下亚段和东三段为烃源岩层段,实测总有机碳含量(TOC)高,最高可达3.91%。由于研究区东营组实测TOC数据离散且稀疏,难以有效参与有机质含量的校正计算,故采用 $\Delta \lg R$ 法(R 为电阻率)对研究区东二段下亚段和东三段暗色泥岩展开TOC预测。在此基础上,依托徐泽阳^[38]等提出的有机质含量校正方法及杨毅^[39]等建立的渤中凹陷东营组超压层有机碳含量校正模型对声波时差和密度测井值进行校正。以研究区CFD18-A井为例,对该井东二段下亚段和东三段泥岩点声波时差和密度进行了校正(图2),结果表明:东二段下亚段泥岩点声波时差和密度受总有机碳含量影响相对较小,平均校正幅度分别为2.53%和1.56%;东三段泥岩点声波时差和密度受总有机碳含量影响较大,平均校正幅度分别为8.79%和6.82%。

2.2 Eaton 法

等效深度法预测结果与DST实测压力数据对比显示(表1),研究区浅层东一段和东二段上亚段预测效果较好,相对误差控制在10%以内。东二段下亚段和东三段预测精度相对较低,存在一定误差,因此考虑用Eaton法重新预测研究区东三段和东二段下亚段现今地层压力。

Eaton法即经验公式法,是基于泥页岩压实理论基础上建立的一种半定量经验关系法,其综合考虑了除压实作用以外的超压成因机制对超压形成的影响^[40]。该方法预测地层压力的关键在于Eaton指数 N (无量纲)的求取。

Eaton公式如下:

$$p_f = p' - (p' - p_n)(\Delta t_w / \Delta t)^N \quad (10)$$

式中: p_f 为孔隙流体压力,MPa; p' 为上覆地层压力,MPa; p_n 为静水压力,MPa; Δt_w 为正常压实趋势线上的声波时差,μs/m; Δt 为实际测井的声波时差,μs/m。

在完成高有机碳含量泥岩段声波时差及密度值有机质校正的基础上,使用Eaton法预测研究区东二段下亚段和东三段现今地层压力,预测过程中需结合实测地层压力数据不断调整Eaton指数,最终确定当 $N = 2.4 \sim 2.6$ 时,预测结果较为准确。如表1所示,采用等效深度法和Eaton法分段预测的方式,能有效改善预测效果。

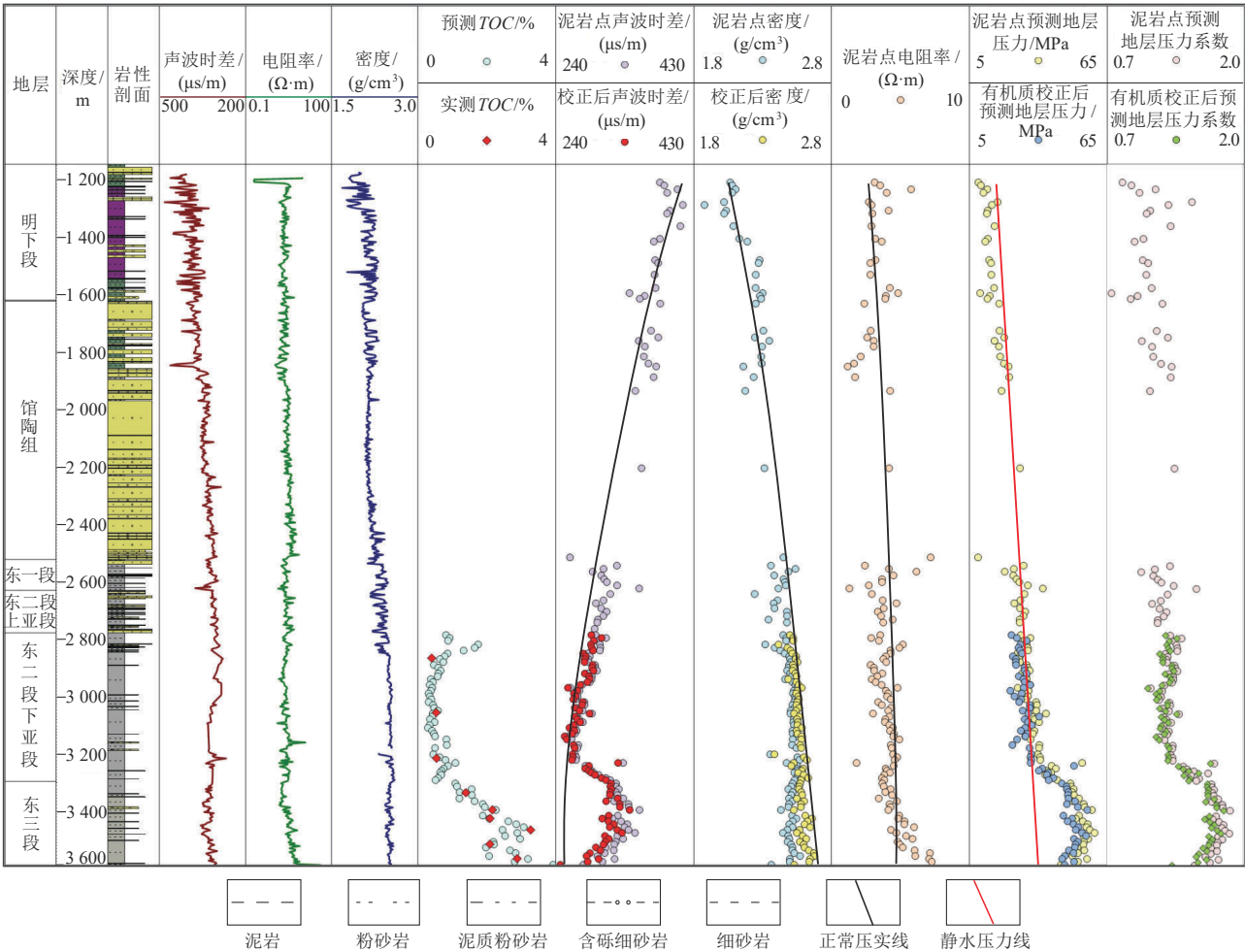


图2 渤中凹陷西南洼CFD18-A井现今地层压力预测综合柱状图
Fig. 2 Composite column showing the predicted present-day formation pressure of well CFD18-A in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

表1 渤中凹陷西南洼典型井实测与预测地层压力误差分析

Table 1 Comparison between measured and predicted formation pressure of typical wells in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

井号	层位	深度/m	实测地层 压力/MPa	等效深度法		Eaton 法	
				预测地层压力/ MPa	相对误差/%	预测地层压力/MPa	相对误差/%
CFD21-A	N ₁ g	1 548. 0	15. 19	15. 15	0. 26	—	—
BZ19-A	E ₃ d ¹	3 045. 3	29. 20	31. 06	6. 37	—	—
BZ13-B	E ₃ d ^{2U}	3 382. 5	36. 80	34. 91	5. 14	—	—
BZ13-D	E ₃ d ^{2L}	3 350. 8	48. 61	43. 68	10. 14	45. 55	6. 30
BZ13-D	E ₃ d ^{2L}	3 610. 3	55. 83	53. 57	4. 05	55. 97	0. 25
BZ13-D	E ₃ d ^{2L}	3 693. 2	49. 59	42. 81	13. 67	45. 16	8. 93
BZ19-A	E ₃ d ^{2L}	3 589. 9	46. 19	39. 12	15. 31	41. 97	9. 14
BZ19-A	E ₃ d ^{2L}	3 675. 2	59. 29	52. 07	12. 18	57. 76	2. 58
BZ19-A	E ₃ d ^{2L}	3 887. 5	62. 70	54. 27	13. 44	61. 86	1. 34
CFD18-A	E ₃ d ³	3 588. 5	34. 73	39. 85	14. 74	32. 52	6. 36
CFD23-A	E ₂ s	3 307. 1	55. 15	57. 19	3. 70	—	—

注:“—”表示无相关数据。

3 现今地层压力特征

以单井地层压力预测数据为基础,结合前人研究成果^[41]和研究区实际情况,将渤中凹陷西南洼地区地层压力划分为4种类型:①压力系数小于1.0为常压带;②压力系数介于1.0~1.2为超压过渡带;③压力系数介于1.2~1.4为弱超压带;④压力系数大于1.4为强超压带。按照该标准在全区范围内进行压力系统划分。

3.1 地层压力剖面分布特征

研究区东营组纵向上发育一套完整的超压系统,自上而下分别为超压过渡带、弱超压带和强超压带(图3)。东一段整体埋藏较浅,且受地层抬升剥蚀影响显著,超压发育幅度小,为常压带和弱超压带之间的过渡带。东二段上亚段厚度薄,以发育超压过渡带为主,靠近主注深处转变为弱超压带,平均地层压力系数约为1.1。东二段下亚段埋藏较深,超压发育情况复

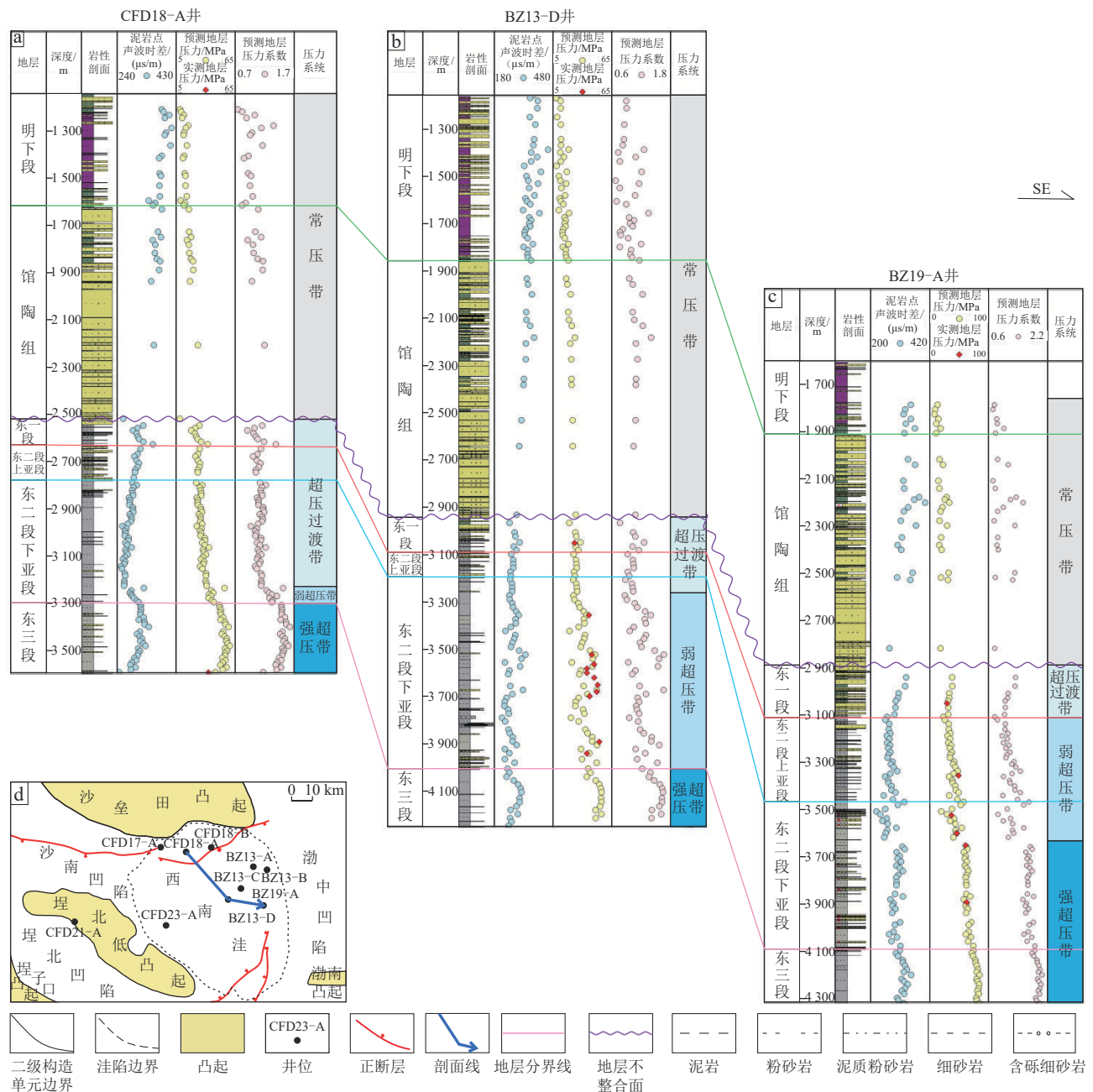


图3 渤中凹陷西南洼地层压力剖面分布特征

Fig. 3 Profiles showing the distribution of formation pressure in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

a. CFD18-A井; b. BZ13-D井; c. BZ19-A井; d. 连井剖面平面位置

杂,从靠近凸起带向渤中凹陷主洼方向,地层压力系数不断增大,压力系统由以超压过渡带为主逐渐向弱超压带、强超压带转变。东三段埋藏最深,超压发育幅度大,主要发育强超压带,平均地层压力系数在1.5左右,最高可达2.0以上。

3.2 地层压力平面展布特征

平面上,研究区东营组超压发育中心与沉积中心一致,紧紧围绕生烃洼陷分布,地层压力整体呈现西低东高的特征,越靠近凹陷中心压力系数越大。各层段内超压发育特征具有明显差异(图4),东三段广泛发育强超压,地层压力系数由西南坳北低凸起向渤中凹陷主洼增大,最大可达1.7以上。东二段下亚段超压发育幅度与范围较东三段有所减小,地层压力变化趋势与东三段一致,最大可达1.5以上。东二段上亚段

主要发育超压过渡带,仅靠近凹陷主洼部分区域发育弱超压带,地层压力系数整体偏小。东一段在研究区范围内为超压过渡带,受活跃构造运动抬升剥蚀的影响,超压发育范围明显减小,地层压力系数由剥蚀区向东北方向逐渐增大。

4 超压成因机制识别

超压的成因主要可以分为欠压实、流体膨胀、成岩作用、构造挤压和压力传递5类,其中欠压实和流体膨胀中的生烃作用是形成大规模超压的重要机制^[3]。研究区东营组超压发育空间特征具有差异性,考虑为多种超压成因机制共同作用的结果。超压成因判别方法分为直接的实证方法和间接的推理方法^[13],前者主要分析超压的地球物理测井响应特征,具体包括测井曲

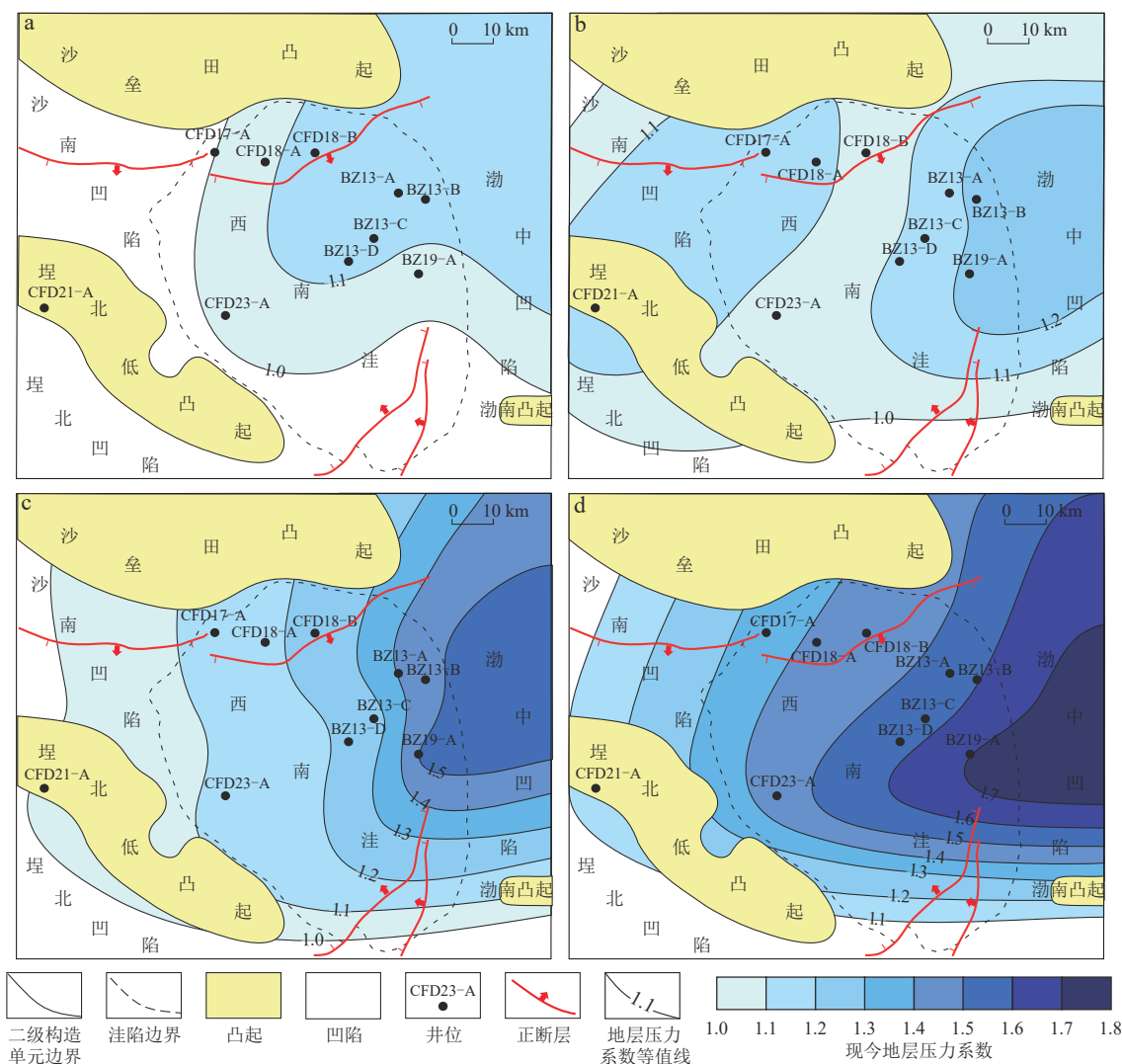


图4 渤中凹陷西南洼东营组不同层段压力平面展布特征

Fig. 4 Planar distribution of formation pressure at varying intervals of the Dongying Formation in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

a. 东一段;b. 东二段上亚段;c. 东二段下亚段;d. 东三段

线综合分析法、声波速度-密度交会图法等^[42],后者重点分析超压的分布特征及形成条件。

4.1 测井曲线综合分析法

声波时差和电阻率测井能敏锐识别孔隙流体连通性的变化,反映岩石的传导特征;而密度和中子测井能敏锐识别岩石储集能力的变化,反映岩石的体积特征^[43]。因此,运用声波时差、电阻率和密度 3 组测井曲线综合分析能有效判识超压成因机制^[44]。对欠压实成因的超压而言,声波时差随埋藏深度增加而增大,电阻率和密度则随埋藏深度增加而显著减小;对生烃膨胀成因的超压而言,声波时差和电阻率随埋藏深度增加而明显增大,同时密度变化不明显^[13]。此外,明确声波速度、电阻率和密度测井曲线反转是否同步对分析超压成因同样具有重要意义。若 3 组测井曲线发生同步反转,指示超压属于欠压实成因;若 3 组测井曲线反转不同步,且密度反转明显滞后,则反映超压属于非欠压实成因,可能为生烃膨胀或构造加载等成因^[12]。

以研究区 BZ13-C 井为例(图 5),3 组曲线首先在深度 3 500 m 左右发生同步反转,随着埋藏深度的增加,其上地层声波时差逐渐减小,电阻率和密度不断增大,反映地层经历正常压实作用,流体连通性变差;其

下地层声波时差突然增大,电阻率和密度反转减小,反映地层因遭受欠压实作用而产生孔隙度异常,流体连通性增强。其次,声波时差和电阻率曲线在深度 3 850 m 左右同步反转增大,而密度曲线反转减小略微滞后,反转深度约为 3 900 m,表明岩石属性无明显变化,异常高压可能由生烃膨胀引起。

4.2 声波速度-密度交会图法

通过建立泥岩的声波速度与密度关系来推测地层压力成因,该方法在 21 世纪初兴起并被广泛应用^[13]。前人研究认为,只有正常压力和欠压实成因的超压落在声波速度-密度交汇图的加载曲线上,其他成因的超压则位于加载曲线外,具体表现为:①若声波速度随超压幅度增加而减小,且密度基本保持不变,则认为超压成因为流体膨胀^[45];②若密度随超压幅度增加而增大,且声波速度基本保持不变,则认为超压成因为成岩作用^[46];③若声波速度和密度同时随超压幅度增加而增大,则认为超压成因为构造挤压。

根据研究区 BZ13-D 井和 CFD18-A 井声波速度-密度交汇图版判别结果(图 6),认为 BZ13-D 井东二段下亚段和东三段声波速度-密度散点主要落在加载曲线上,整体符合加载曲线的变化趋势,为欠压实成因。

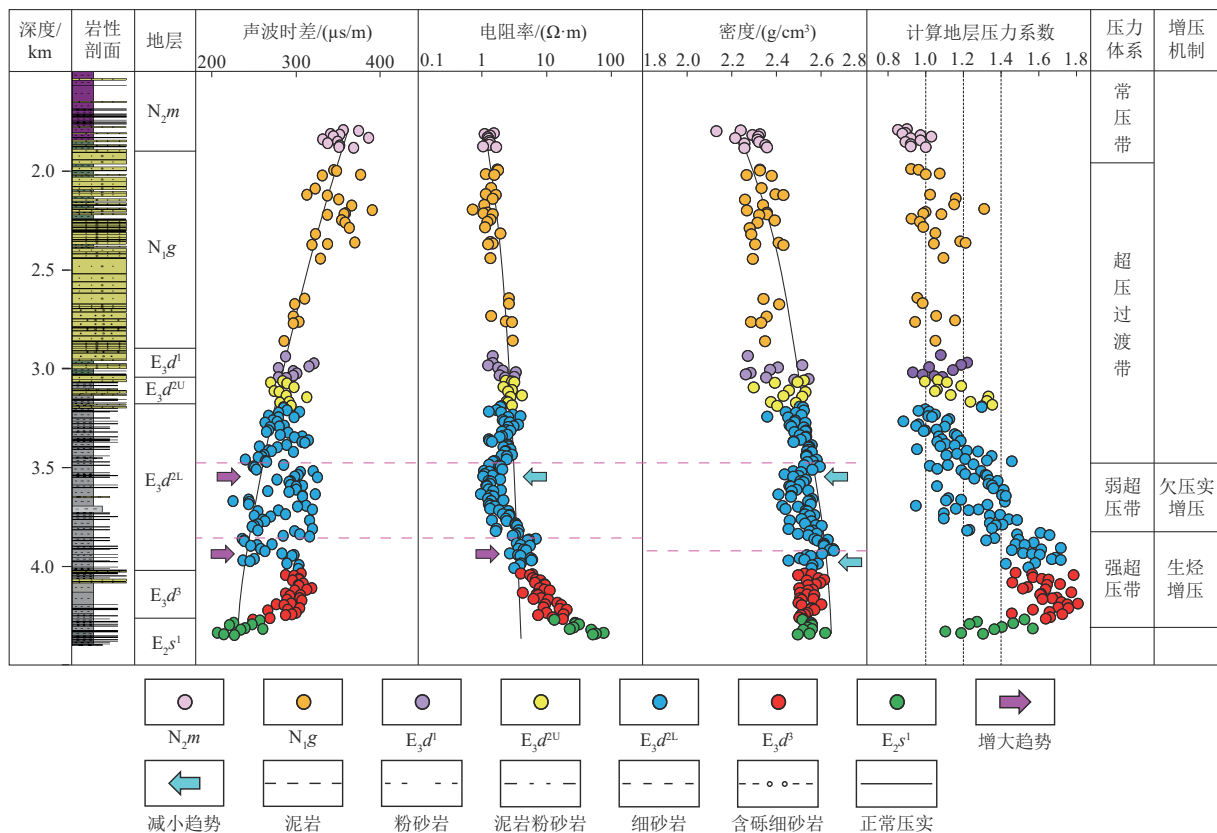


图 5 渤中凹陷西南洼东营组 BZ13-C 井测井曲线综合响应特征

Fig. 5 Comprehensive responses of log curves of well BZ13-C in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

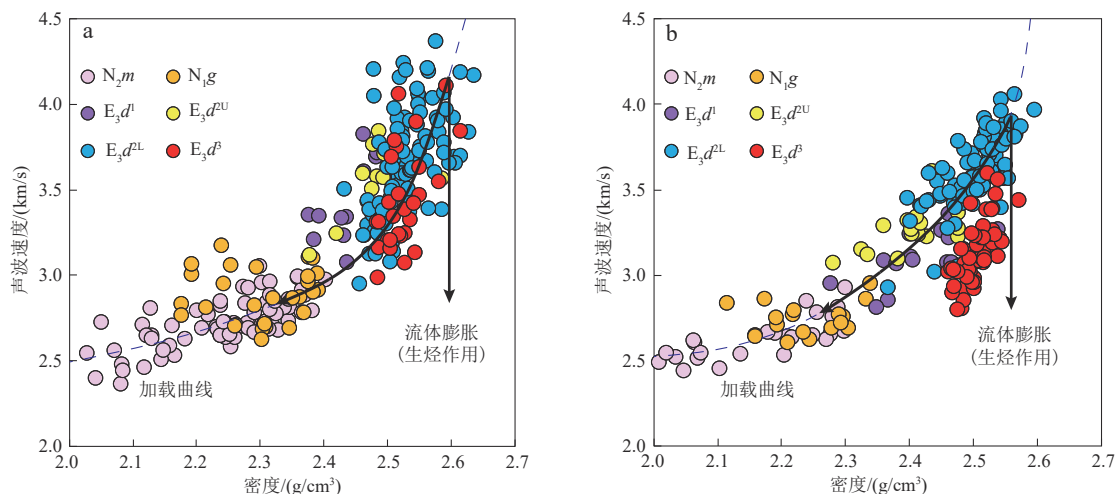


图6 渤中凹陷西南洼东营组 BZ13-D 井(a)和 CFD18-A 井(b)声波速度-密度交汇图

Fig. 6 Sonic velocity vs. density cross plots of wells BZ13-D (a) and CFD18-A (b) in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag
a. BZ13-D 井; b. CFD18-A 井

CFD18-A 井东二段下亚段数据大部分落在加载曲线上,为欠压实成因,而东三段数据明显偏离加载曲线,呈声波速度减小、密度略微减小的特征,结合研究区地温特征,判断为欠压实-生烃膨胀复合成因。

4.3 综合分析法

综合分析法是在测井曲线综合分析法和声波速度-密度交会图法等实证方法研究的基础上,结合超压形成地质条件、分布特征及模拟技术等进行综合分析,最终确定超压成因。

4.3.1 欠压实

欠压实成因的超压通常产生于地层埋藏速率较大时的快速沉积细粒沉积物中,由于快速沉降导致上覆地层压力增大,但地层孔隙流体未能及时排出,因此孔隙流体因承担部分有效应力而产生异常高压^[16]。前人研究表明,沉积速率大于 200 m/Ma 是产生欠压实作用的基本条件^[47-48],东营组最大沉积厚度可达 3 000 m,平均沉积速率约为 200 m/Ma,具备形成欠压实成因超压的前提条件^[49]。等效深度法计算东营组地层压力结果表明,东一段-东二段上亚段地层压力计算值与实测值吻合度较高,指示欠压实成因;而东二段下亚段和东三段地层压力计算值小于实测值,暗示除欠压实成因外还存在其他成因机制。

4.3.2 有机质生烃

生烃增压是由于有机质热降解生油或油热裂解生成气体造成孔隙流体膨胀^[50],进而导致孔隙流体压

力增加,是形成强超压的有利条件之一。研究区东营组实测镜质体反射率(R_o)为 0.45%~0.76%,开始生烃的起始深度约为 2 650 m(图 7a),反映烃源岩已进入成熟生烃阶段。 TOC 分析结果显示,东二段 TOC 最大值为 2.60%,平均值为 0.68%,东三段 TOC 最大值为 4.34%,平均值为 2.48%(图 7b)。烃源岩的生烃能力影响着超压的发育幅度,研究区东二段下亚段有机质丰度相对较差,生烃潜力小,有机质生烃作用难以对超压形成做出重大贡献;东三段埋深较大,发育优质烃源岩,其有机质丰度较高,有机质类型以 II_1-II_2 型为主^[51],整体处于成熟热演化阶段,部分地区达到高成熟热演化阶段,具备大量生烃形成异常高压的条件。

4.4 超压成因分布特征及贡献率

由于地层压实具有不可逆性,后期孔隙体积不会随孔隙流体压力增加而增大,从而导致岩石密度发生显著变化^[52]。因此,将基于实测泥岩密度资料的等效深度法计算的欠压实成因地层压力与 Eaton 法计算的地层压力总量进行对比,能量化评价研究区东营组复合成因超压中欠压实成因的贡献率^[53]。以 BZ13-C 井为例,东二段下亚段主要发育欠压实成因的弱超压,从深度 3 500 m 至东三段底部发育欠压实-生烃膨胀复合成因的强超压(图 5)。等效深度法与 Eaton 法计算结果对比显示,该井东二段下亚段欠压实超压贡献率为 64.20%~92.80%,平均为 79.53%;东三段欠压实超压贡献率为 54.30%~82.60%,平均为 63.78%。对研究区欠压实-生烃膨胀复合成因超压进行欠压实

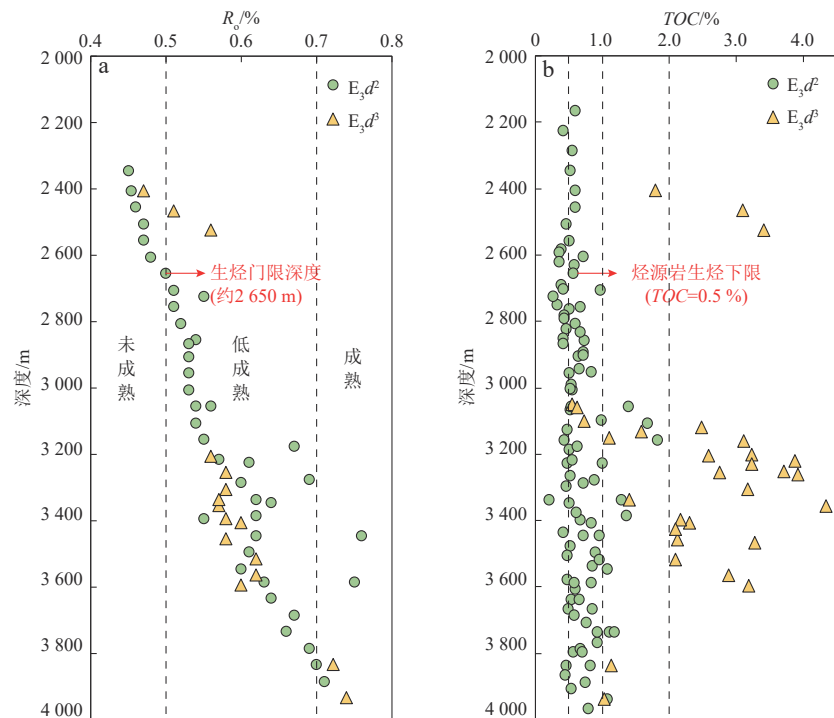


图 7 渤中凹陷西南洼东营组实测 R_o 和 TOC 与深度对应关系

Fig. 7 Cross plots of depth vs. measured R_o (a) and TOC (b) of the Dongying Formation in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

成因贡献率统计发现(表 2),纵向上欠压实成因超压贡献率随埋深增加而减小,平面上从洼陷中心向凸起带欠压实成因超压贡献逐渐增加。

综合渤中凹陷西南洼 10 口重点井超压成因分析结果(表 2),认为研究区东二段下亚段超压以欠压实成因为主,仅靠近渤中凹陷主洼部分井位发育优质烃源岩,超压由欠压实和有机质生烃共同作用形成。东三段是研究区主力烃源岩发育层,超压主要为欠压实-生烃膨胀复合成因,但部分井位靠近凸起区,埋藏深度浅,有

机质未成熟,为欠压实成因。综上所述,随着埋藏深度增加,东营组超压成因机制由欠压实主导型转化为欠压实-生烃膨胀复合型,同时还具有区域差异性。

5 地层古压力与油气分布关系

5.1 盆地模拟恢复地层古压力

盆地模拟技术可以再现不同地质历史时期的埋藏

表 2 渤中凹陷西南洼单井各层段超压成因机制统计

Table 2 Statistics of the genetic mechanisms of overpressure at various intervals of wells in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

井号	E_3d^{2L}		E_3d^3	
	成因机制	欠压实成因超压贡献率/%	成因机制	欠压实成因超压贡献率/%
CFD17-A	欠压实	—	欠压实+生烃膨胀	58.7 ~ 89.4
CFD18-A	欠压实	—	欠压实+生烃膨胀	59.4 ~ 90.7
CFD18-B	欠压实	—	欠压实+生烃膨胀	55.6 ~ 86.3
CFD21-A	欠压实	—	欠压实	—
CFD23-A	欠压实	—	欠压实	—
BZ13-A	欠压实	—	欠压实+生烃膨胀	50.2 ~ 78.6
BZ13-B	欠压实+生烃膨胀	62.3 ~ 93.5	欠压实+生烃膨胀	46.6 ~ 72.3
BZ13-C	欠压实+生烃膨胀	64.2 ~ 92.8	欠压实+生烃膨胀	54.3 ~ 82.6
BZ13-D	欠压实	—	欠压实	—
BZ19-A	欠压实	—	欠压实+生烃膨胀	48.9 ~ 76.8

注:“—”表示该层位超压为欠压实成因,未计算其贡献率。

演化过程,包括地层埋藏史、热演化史、生排烃史和油气运聚史等^[54]。应用盆地模拟技术恢复研究区东营组古压力主要通过地层回剥的方法,将东营组现今的地层厚度和地层压力恢复到沉积时或埋藏中途某一时刻的地层厚度和地层压力^[55]。本次地层古压力演化模拟采用Petromod软件中的一维模块,该模块能够恢复单井东三段沉积至今的埋藏演化及压力演化过程,进而计算出不同地质历史时期的压力系数。

5.1.1 模拟参数

基于盆地模拟软件进行地层古压力演化模拟需要用到以下参数^[56]:①地层参数(顶-底界厚度、岩性、地层厚度及剥蚀量等);②热史边界条件(古大地热流值、古水深以及古沉积水界面温度);③地层测试数据(温度和压力等);④烃源岩地球化学资料(TOC 、氢指数和 R_o 等)。

首先根据单井分层数据确定各层段厚度,并结合最新国际地层年代表及文献资料确定分层年龄;其次统计各岩性厚度比例进行混合岩性设置,随后依据地层趋势延伸法并结合前人研究成果^[57]确定地层剥蚀厚度。表3展示了以BZ13-B井为例输入的地层模拟相关参数。

盆地模拟研究需要的热史边界条件包括古水深、大地热流值和沉积时水界面温度。沉积时水界面温度采用Wygrala^[58]对古地表温度的研究成果,根据渤中凹陷的地理位置和所处的纬度进行标定。东营组沉积时水界面温度为20~22℃,馆陶组沉积至今水界面温度逐渐降低,现今温度为15~16℃。古今大地热流值和古水深主要参考彭波^[59-60]等的研究成果。表4展示了以BZ13-B井为例输入的热史边界条件参数。

对模拟结果进行校正是提高盆地模拟准确性的关键,本次研究在利用镜质体反射率校正热演化史的基础上,以现今实测地层压力作为预测地层古压力的约束,经过多次模拟还原研究区地层压力演化史^[61]。

5.1.2 模拟结果

本文选取渤中凹陷西南洼BZ13-B井和埕北低凸起CFD21-A井两口重点探井进行单井东营组埋藏史、热演化史及压力演化史模拟。两口重点井模拟结果表明,凹陷区和凸起区东营组具有相似的埋藏演化过程,然而其热演化程度和古压力演化特征存在显著差异。渤中凹陷西南洼凹陷区古压力相对较高,BZ13-B井东三段与东二段从28.0 Ma起开始发育并不断累积异常压力,仅26.9~24.8 Ma时受地层抬升剥蚀影响释放部分压力。现今BZ13-B井东三段与东二段剩余压力为29.81 MPa与14.92 MPa,压力系数可达1.66与1.41(图8b)。埕北低凸起区埋藏深度较凹陷区浅,古压力发育幅度相对较低。CFD21-A井东三段与东二段同样在28.0 Ma左右发育异常压力,但受较凹陷区更长时间的抬升剥蚀作用影响,从24.6~11.9 Ma地层长时间保持常压状态。地层从11.9 Ma起重新发育异常压力并持续累积,现今CFD21-A井东三段与东二段剩余压力为7.12 MPa与3.35 MPa,压力系数仅为1.28与1.15(图8d)。因此,研究区东营组古压力演化主要经历了原始积累—释放—再积累3个阶段,不同层段不同区域古压力演化特征差异明显。

5.2 地层古压力对油气成藏的影响

成藏时期的异常高压可以为油气运移提供充足动力,影响油气的运移方向和聚集效率,是油气成藏的重要影响因素。研究区东营组烃源岩有机质丰度高、有机质类型好,处于成熟生烃阶段,可为BZ19-6潜山提供一定的油气来源^[62-63]。

在应用盆地模拟技术恢复单井烃源岩埋藏史、热演化史及生排烃史的基础上,结合与烃类包裹体伴生的流体包裹体均一温度,明确渤中凹陷西南洼油气藏成藏期主要为约5 Ma^[64]。根据单井地层压力演化史

表3 渤中凹陷西南洼BZ13-B井一维盆地模拟地层相关参数

Table 3 Parameters of strata for 1D basin modeling of well BZ13-B in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

地层	底界年龄/Ma	顶界年龄/Ma	底界深度/m	厚度/m	岩性	剥蚀开始时间/Ma	剥蚀结束时间/Ma	剥蚀厚度/m
Qp	2.6	0.0	512	512	泥岩	—	—	—
N _{2m}	12.0	2.6	1 652	1 140	泥岩	—	—	—
N _{1g}	24.6	12.0	3 080	1 428	细砂岩	—	—	—
E/N剥蚀	—	—	—	—	—	27.0	24.6	120
E ₃ d ¹	27.4	27.0	3 245	165	细砂岩	—	—	—
E ₃ d ²	30.3	27.4	3 931	686	泥岩	—	—	—
E ₃ d ³	32.8	30.3	3 975	44	泥岩	—	—	—

注:“—”表示正常沉积地层无剥蚀相关数据或剥蚀地层无沉积相关数据。

表 4 渤中凹陷西南洼 BZ13-B 井一维盆地模拟热史边界条件参数

Table 4 Boundary parameters of thermal history for 1D basin modeling of well BZ13-B in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

年龄/Ma	古水深/m	沉积水表面温度/°C	大地热流值/(mW/m ²)
0.0	24.3	15.34	55.0
2.6	25.0	15.24	56.7
5.3	43.0	15.18	58.4
12.0	50.0	17.53	65.0
24.6	0.0	21.04	79.0
25.0	20.0	20.10	79.5
27.4	35.0	20.44	78.9

揭示成藏期东营组压力特征:东三段埋藏最深,压力系数最大,以发育强超压为主;东二段下亚段地层压力系数介于 1.2 ~ 1.4,主要发育弱超压;东二段上亚段埋

藏较浅,压力系数小,形成大范围超压过渡带;东一段及以上地层不发育异常压力(图 8)。油气运聚过程中,东二段下亚段和东三段烃源岩超压显著发育,而深层变质岩潜山储层则属于正常压力带^[9],在源-储压差的作用下,油气沿不整合面向下运移至太古宇变质岩潜山储层中,或沿断层发生侧向运移至离生烃中心较远的潜山储层中聚集成藏^[65](图 9)。

研究区东三段和东二段发育的厚层泥岩作为区域性盖层,其孔隙流体压力明显高于下伏储集层,形成向下的孔隙流体压力差,能有效阻止油气向上逸散,对油气起到封闭的作用^[66];且盖层内异常孔隙流体压力越大,其与储层之间的压力差就越大,对油气的封闭能力就越强^[62]。研究区东三段和东二段在 5 Ma 以后持续积累异常压力,对油气的封闭能力逐渐增强,能为油气运移聚集及保存提供强有力的保障。

此外,超压能诱导微裂缝发育,与新构造运动时期

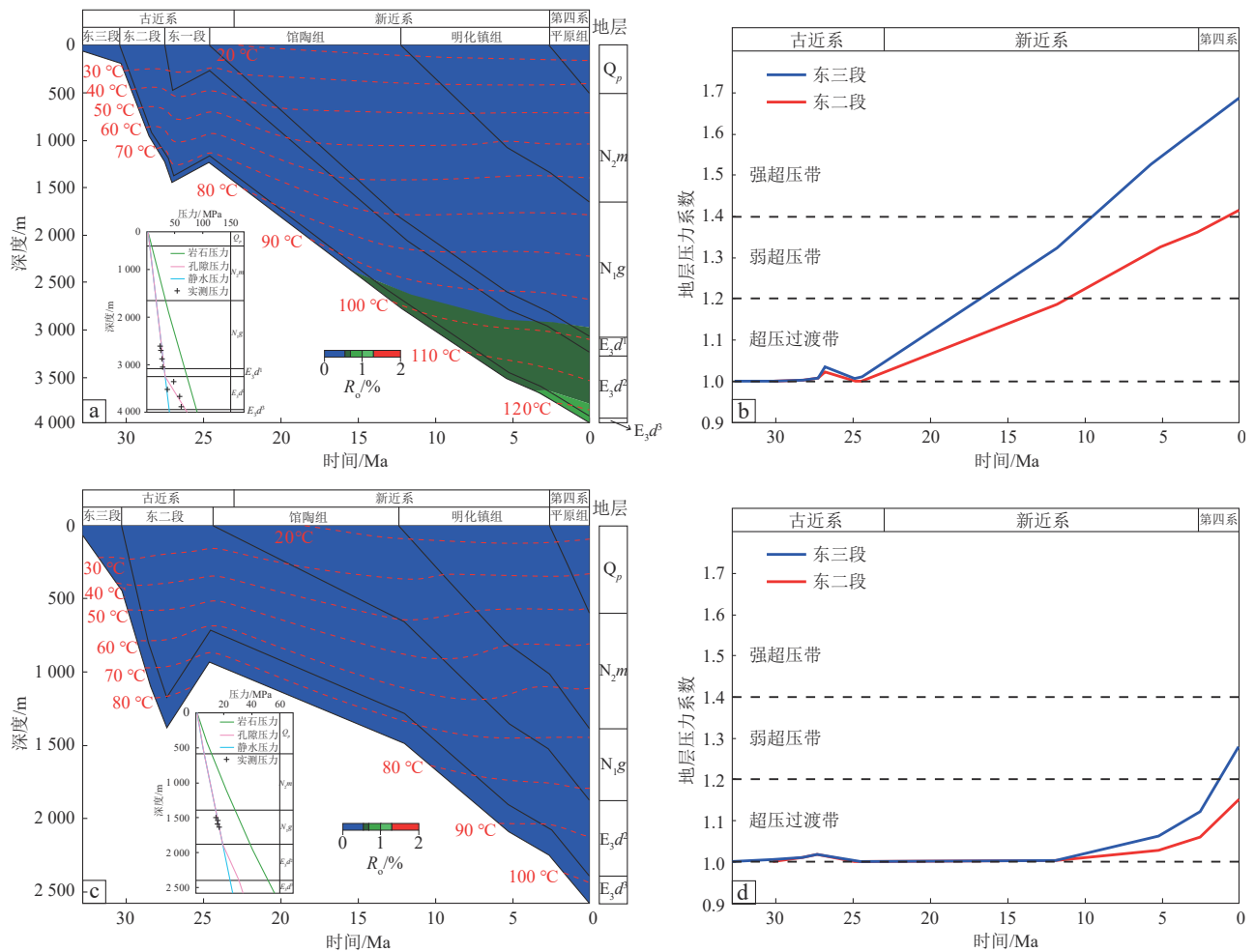


图 8 渤中凹陷西南洼单井盆地模拟地层埋藏史-压力演化史结果

Fig. 8 Basin modeling-derived single-well burial and pressure evolution histories of the southwestern sub-sag, Bozhong Sag
a. 凹陷区 BZ13-B 井地层埋藏史-热演化史; b. 凹陷区 BZ13-B 井地层压力系数随时间变化; c. 凸起区 CFD21-A 井地层埋藏史-热演化史;
d. 凸起区 CFD21-A 井地层压力系数随时间变化

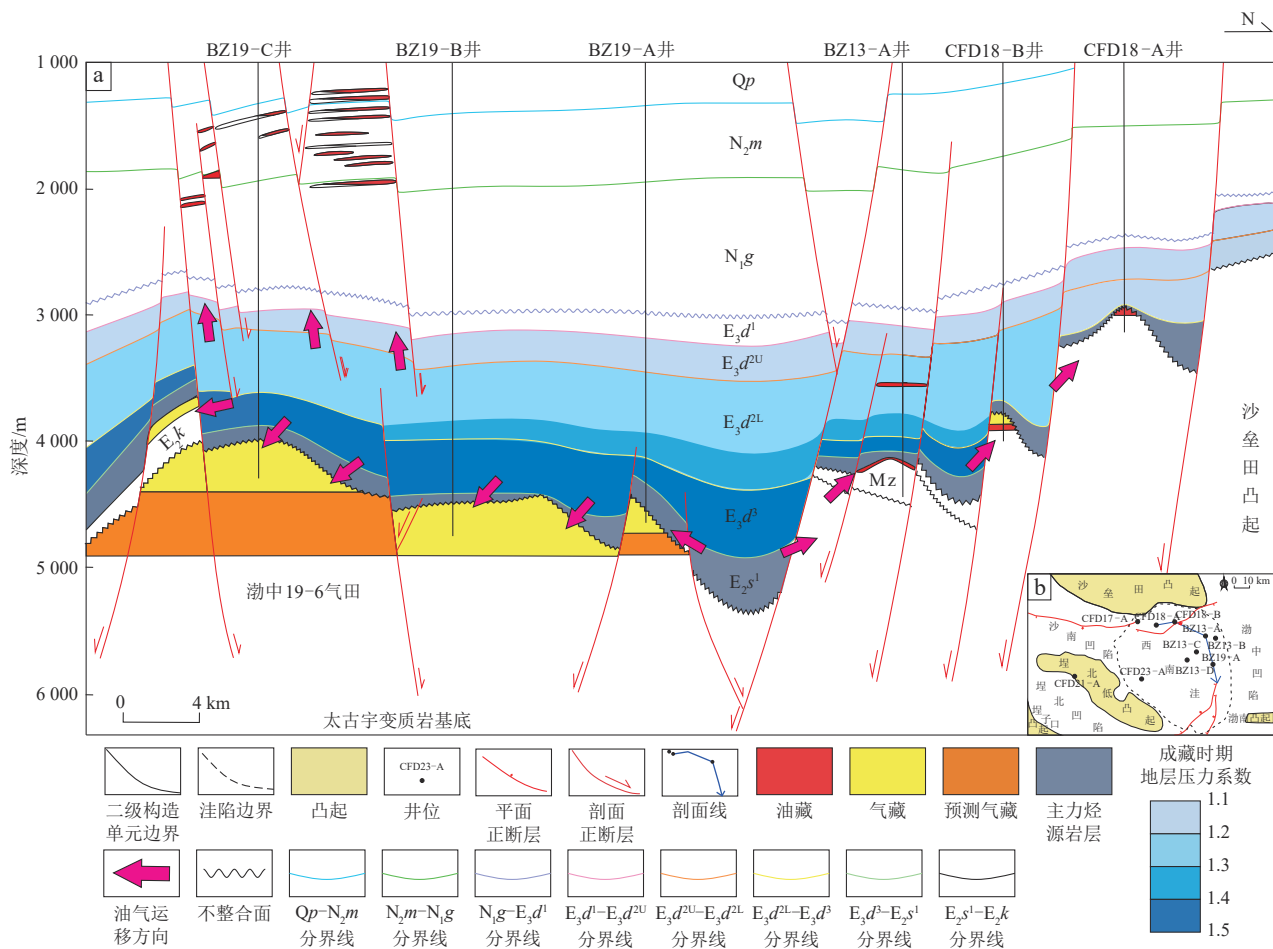


图9 渤中凹陷西南洼地地层古压力与油气分布关系

Fig. 9 Effects of formation paleopressure on hydrocarbon distribution in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag

a. 地层古压力与油气分布; b. 连井剖面平面位置

形成的“Y”字形断层连通,构成油气二次运移的优势通道。在此基础上,超压作为油气二次运移的有效动力来源,促进油气沿断层发生垂向运移至浅层馆陶组 and 明化镇组,形成断块油藏^[67]。

6 结 论

1) 渤中凹陷西南洼东营组纵向上发育一套完整的超压系统,自上而下分别为超压过渡带、弱超压带和强超压带。平面上超压中心与沉积中心一致,紧紧围绕生烃洼陷分布,地层压力整体呈现西低东高的特征,越靠近凹陷中心压力系数越大。

2) 渤中凹陷西南洼东营组超压成因机制包括欠压实成因和生烃膨胀成因,且随埋藏深度增加,超压成因机制由欠压实主导型转化为欠压实-生烃膨胀复合型,具有区域差异性。

3) 渤中凹陷西南洼东营组古压力演化主要经历了原始积累—释放—再积累3个阶段,凹陷区埋藏深

度大,烃源岩进入成熟-高成熟阶段,异常压力发育幅度远大于凸起区。

4) 渤中凹陷西南洼东三段和东二段下亚段烃源岩层超压显著发育,不仅可以为油气运移提供充足动力,同时能向下形成超压流体封盖,阻止油气向上逸散。

参 考 文 献

- [1] 马启富, 陈斯忠, 张启明, 等. 超压盆地与油气分布[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1-10.
MA Qifu, CHEN Sizhong, ZHANG Qiming, et al. Overpressure basins and petroleum distribution [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-10.
- [2] 蒋有录, 王鑫, 于倩倩, 等. 渤海湾盆地含油气凹陷压力场特征及与油气富集关系[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1361-1369.
JIANG Youlu, WANG Xin, YU Qianqian, et al. Pressure field characteristics of petroliferous depressions and its relationship with hydrocarbon enrichment in Bohai Bay Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2016, 37(11): 1361-1369.

- [3] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 50.
- HAO Fang. Hydrocarbon generation kinetics and hydrocarbon accumulation mechanism in overpressure basins [M]. Beijing: Science Press, 2005: 50.
- [4] 李国雄, 刘成林, 王飞龙, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷东营组烃源岩地球化学特征及生烃模式[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1568-1584.
- LI Guoxiong, LIU Chenglin, WANG Feilong, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation mode of source rocks of Dongying Formation in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(11): 1568-1584.
- [5] 吴智平, 张勐, 张晓庆, 等. 渤海湾盆地“埕北-垦东”构造转换带形成演化及成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1321-1333, 1358.
- WU Zhiping, ZHANG Meng, ZHANG Xiaoqing, et al. Evolution and reservoir characteristics of the “Chengbei-Kendong” structural transfer zone in the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1321-1333, 1358.
- [6] LIU Hua, JIANG Youlu, SONG Guoqi, et al. Overpressure characteristics and effects on hydrocarbon distribution in the Bonan Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 811-821.
- [7] 沈章洪. 渤海油田古近系超压成因分类及分布特征[J]. 中国海上油气, 2016, 28(3): 31-36.
- SHEN Zhanghong. Genetic classification and distribution characteristics of overpressure in the Paleogene of Bohai oilfields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(3): 31-36.
- [8] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38.
- XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, et al. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 25-38.
- [9] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 891-902.
- XUE Yongan, WANG Qi, NIU Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 891-902.
- [10] 李慧勇, 牛成民, 许鹏, 等. 渤中13-2大型整装覆盖型潜山油气田的发现及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 19-26.
- LI Huiyong, NIU Chengmin, XU Peng, et al. Discovery of Bozhong 13-2 Archean large monoblock volatile buried hill oilfield and its oil and gas exploration significance [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 19-26.
- [11] 施和生, 牛成民, 侯明才, 等. 渤中13-2双层结构太古宇潜山成藏条件分析与勘探发现[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 12-20.
- SHI Hesheng, NIU Chengmin, HOU Mingcai, et al. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions of double-layered Archeozoic buried hill and major discovery of Bozhong 13-2 oil and gasfield, Bohai Sea area [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 12-20.
- [12] BOWERS G L. Detecting high overpressure [J]. The Leading Edge, 2002, 21(2): 174-177.
- [13] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 973-998.
- ZHAO Jingzhou, LI Jun, XU Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(9): 973-998.
- [14] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79-85.
- HAO Fang, DONG Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 79-85.
- [15] 刘华, 蒋有录, 谷国翠, 等. 沾化凹陷渤南洼陷古近系压力特征及成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 46-51, 70.
- LIU Hua, JIANG Youlu, GU Guocui, et al. Pressure characteristics and formation mechanisms of Paleogene in Bonan Sag, Zhanhua Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(4): 46-51, 70.
- [16] DICKINSON G. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(2): 410-432.
- [17] HANSOM J, LEE M K. Effects of hydrocarbon generation, basal heat flow and sediment compaction on overpressure development: A numerical study [J]. Petroleum Geoscience, 2005, 11(4): 353-360.
- [18] 郝芳, 蔡东升, 邹华耀, 等. 渤中坳陷超压-构造活动联控型流体流动与油气快速成藏[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2004, 29(5): 518-524.
- HAO Fang, CAI Dongsheng, ZOU Huayao, et al. Overpressure-tectonic activity controlled fluid flow and rapid petroleum accumulation in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2004, 29(5): 518-524.
- [19] 庞雄奇, 郭永华, 姜福杰, 等. 渤海海域优质烃源岩及其分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 393-397.
- PANG Xiongqi, GUO Yonghua, JIANG Fujie, et al. High-quality source rocks and their distribution prediction in the Bohai Sea waters [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 393-397.
- [20] 张新涛, 张藜, 刘晓健. 渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山岩优质储层发育规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 1-16.
- ZHANG Xintao, ZHANG Li, LIU Xiaojian. Development regularity of the Mesozoic volcanic reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),

- 2023, 53(1): 1-16.
- [21] 王德英, 刘晓健, 邓辉, 等. 渤海湾盆地渤中19-6区中-新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1334-1346.
- WANG Deying, LIU Xiaojian, DENG Hui, et al. Characteristics of the Meso-Cenozoic tectonic transformation and its control on the formation of large-scale reservoirs in the Archean buried hills in Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1334-1346.
- [22] 王祥, 马劲风, 王飞龙, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷西南部深层烃源岩有机相预测[J]. 石油实验地质, 2022, 44(6): 1070-1080.
- WANG Xiang, MA Jinfeng, WANG Feilong, et al. Prediction of organic facies of deep source rocks in southwestern part of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(6): 1070-1080.
- [23] 赵少泽, 李勇, 程乐利, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷沙河街组烃源岩特征及沉积环境[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 627-632.
- ZHAO Shaoze, LI Yong, CHENG Leli, et al. Characteristics and depositional environment of source rocks in Shahejie Formation, Cangdong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(5): 627-632.
- [24] 李军亮, 王鑫, 王伟庆, 等. 致密砂岩砂-泥结构发育特征及其对储集空间的控制作用——以渤海湾盆地临南洼陷古近系沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1173-1187.
- LI Junliang, WANG Xin, WANG Weiqing, et al. Influence of sand-mud assemblages in tight sandstones on reservoir storage spaces: A case study of the lower submember of the 3rd member of the Paleogene Shahejie Formation in the Linnan sub-sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1173-1187.
- [25] 薛永安, 许鹏, 汤国民. 渤中凹陷西南环特大型高产油气聚集带的发现与勘探启示[J]. 中国海上油气, 2023, 35(3): 1-11.
- XUE Yongan, XU Peng, TANG Guomin. Discovery and exploration implications of super-large high-yield oil and gas accumulation zone in the southwest belt of Bozhong Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(3): 1-11.
- [26] 吕传炳, 庞雄奇, 国芳馨, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷肃宁-大王庄地区中深层沉积特征及有利储层评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(5): 1-8.
- LYU Chuanbing, PANG Xiongqi, GUO Fangxin, et al. Sedimentary characteristics and favorable reservoir evaluation of medium-deep formation in Suning-Dawangzhuang area of Raoyang Sag in Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(5): 1-8.
- [27] 王冠民, 熊周海, 张健, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷油藏断裂特征及对成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 62-70.
- WANG Guanmin, XIONG Zhouhai, ZHANG Jian, et al. Characterization of fault system and its control on reservoirs in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 62-70.
- [28] 谢玉洪, 张功成, 沈朴, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷大气田形成条件与勘探方向[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1199-1210.
- XIE Yuhong, ZHANG Gongcheng, SHEN Piao, et al. Formation conditions and exploration direction of large gas field in Bozhong Sag of Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1199-1210.
- [29] 赵淑娟, 李三忠, 牛成民, 等. 渤海湾盆地旅大隆起区多期叠加构造及其对潜山的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1188-1202.
- ZHAO Shujuan, LI Sanzhong, NIU Chengmin, et al. Multistage structural superimposition and its control on buried hills in the Lyuda uplift zone, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1188-1202.
- [30] 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾盆地新生代构造演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(S1): 1-6.
- QI Jiafu, ZHANG Yiwei, LU Kezheng, et al. Cenozoic tectonic evolution of Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1995, 19(S1): 1-6.
- [31] QIU Nansheng, XU Wei, ZUO Yinhuai, et al. Meso - Cenozoic thermal regime in the Bohai Bay Basin, eastern North China craton [J]. International Geology Review, 2015, 57(3): 271-289.
- [32] 蒋有录, 苏圣民, 刘华, 等. 渤海湾盆地新生界沉积洼陷类型及与油气富集的关系[J]. 石油学报, 2019, 40(6): 635-645.
- JIANG Youlu, SU Shengmin, LIU Hua, et al. Types of Cenozoic sedimentary subsags and their relationship with hydrocarbon enrichment in Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(6): 635-645.
- [33] 霍智颖, 何生, 王永诗, 等. 渤海湾盆地惠民凹陷临南洼陷沙河街组现今超压分布特征及成因[J]. 石油实验地质, 2020, 42(6): 938-945.
- HUO Zhiying, HE Sheng, WANG Yongshi, et al. Distribution and causes of present-day overpressure of Shahejie Formation in Linnan Subsag, Huimin Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(6): 938-945.
- [34] 杨韬政, 刘成林, 田继先, 等. 柴达木盆地大风山凸起地层压力预测及成因分析[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(1): 96-107.
- YANG Taozheng, LIU Chenglin, TIAN Jixian, et al. Prediction and genesis of formation pressure in Dafengshan uplift, Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(1): 96-107.
- [35] DUTTA N C. Geopressure prediction using seismic data: Current status and the road ahead [J]. Geophysics, 2002, 67(6): 2012-2041.
- [36] 卢龙飞, 蔡进功, 刘文汇, 等. 泥岩与沉积物中粘土矿物吸附有机质的三种赋存状态及其热稳定性[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 16-26.
- LU Longfei, CAI Jingong, LIU Wenhui, et al. Occurrence and thermostability of absorbed organic matter on clay minerals in mudstones and muddy sediments [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 16-26.

- [37] 李超, 张立宽, 罗晓容, 等. 泥岩压实研究中有机质导致声波时差异常的定量校正方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 77-87.
- LI Chao, ZHANG Likuan, LUO Xiaorong, et al. A quantitative method for revising abnormally high sonic data in rich-organic rock during compaction study [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 77-87.
- [38] 徐泽阳, 赵靖舟, 李军. 松辽盆地长垣地区白垩系青山口组一段有机质含量对超压分析的影响及校正方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 938-946.
- XU Zeyang, ZHAO Jingzhou, LI Jun. The impact of organic matter content on overpressure analysis and its correction method in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation, Placanticline area, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 938-946.
- [39] 杨毅, 郭东明, 程乐利, 等. 渤中凹陷东营组超压层的有机碳含量校正及超压成因分析[J]. 录井工程, 2023, 34(2): 103-108.
- YANG Yi, GUO Dongming, CHENG Leli, et al. Organic carbon content correction and overpressure genesis analysis for overpressure strata of Dongying Formation in Bozhong Sag [J]. Mud Logging Engineering, 2023, 34(2): 103-108.
- [40] 赵莉莉. 环渤中地区地层压力特征及其与油气分布的关系[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- ZHAO Lili. Characteristics of formation pressure and its relationship with the oil and gas distribution in the Bozhong area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [41] 何玉, 周星, 李少轩, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷古近系地层超压成因及测井响应特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 60-69.
- HE Yu, ZHOU Xing, LI Shaoxuan, et al. Genesis and logging response characteristics of formation overpressure of Paleogene in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(3): 60-69.
- [42] 李培, 刘成林, 冯德浩, 等. 咸化湖盆地层超压特征及成因机制——以柴达木盆地英西地区渐新统为例[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 864-876.
- LI Pei, LIU Chenglin, FENG Dehao, et al. Characteristics and origin mechanism of formation overpressure in the saline lacustrine basin: A case study from the Oligocene in the west of Yingxiong ridge, Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(5): 864-876.
- [43] 宋昊, 蒋有录, 侯帅, 等. 长岭断陷龙凤山地区下白垩统地层压力特征及其对油气成藏的影响[J]. 特种油气藏, 2022, 29(2): 42-50.
- SONG Hao, JIANG Youlu, HOU Shuai, et al. Pressure characteristics and its influence on hydrocarbon accumulation of Lower Cretaceous Formation in Longfengshan area, Changling faulted depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(2): 42-50.
- [44] 刘华, 蒋有录, 卢浩, 等. 渤南洼陷流体包裹体特征与成藏期流体压力恢复[J]. 地球科学, 2016, 41(8): 1384-1394.
- LIU Hua, JIANG Youlu, LU Hao, et al. Restoration of fluid pressure during hydrocarbon accumulation period and fluid inclusion feature in the Bonan Sag[J]. Earth Science, 2016, 41(8): 1384-1394.
- [45] HOESNI M J. Origins of overpressure in the Malay Basin and its influence on petroleum systems [D]. Durham: Durham University, 2004.
- [46] O'CONNOR S, SWARBRICK R, LAHANN R. Geologically-driven pore fluid pressure models and their implications for petroleum exploration. Introduction to thematic set [J]. Geofluids, 2011, 4(11): 343-348.
- [47] EATON B A. The equation for geopressure prediction from well logs [C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, 1975. London: Society of Petroleum Engineers, 1975: SPE-5544-MS.
- [48] 何生, 宋国奇, 王永诗, 等. 东营凹陷现今大规模超压系统整体分布特征及主控因素[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(5): 1029-1042.
- HE Sheng, SONG Guoqi, WANG Yongshi, et al. Distribution and major control factors of the present-day large-scale overpressured system in Dongying Depression [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(5): 1029-1042.
- [49] 王斌. 渤中—辽东湾拗陷超压成因及分布[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- WANG Xiao. The distribution and origin of overpressures in Bozhong-Liaodongwan Depression, Bohai Bay Basin, China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [50] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin: Springer, 1984: 223.
- [51] 阳宏, 刘成林, 王飞龙, 等. 渤中凹陷西南洼东营组烃源岩地球化学特征及环境指示意义[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 339-349.
- YANG Hong, LIU Chenglin, WANG Feilong, et al. Geochemical characteristics and environmental implications of source rocks of the Dongying Formation in southwest subsag of Bozhong Sag [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 339-349.
- [52] 郭小文, 刘可禹, 宋岩, 等. 库车坳陷克拉2气田油气充注和超压对储层孔隙的影响[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6): 935-943.
- GUO Xiaowen, LIU Keyu, SONG Yan, et al. Influences of hydrocarbon charging and overpressure on reservoir porosity in Kela-2 gas field of the Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 935-943.
- [53] 张旭友, 范彩伟, 郭小文, 等. 莺歌海盆地中央底辟带乐东区莺歌海组超压成因及相对贡献量化评价[J/OL]. 地球科学: 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220217.1915.031.html>.
- ZHANG Xuyou, FAN Caiwei, GUO Xiaowen, et al. Overpressure mechanisms and quantitative evaluation of the relative contribution

- for Yinggehai Formation in Ledong area of the Central Diapir Zone, Yinggehai Basin[J/OL]. Earth Science: 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220217.1915.031.html>.
- [54] 冯德浩, 刘成林, 田继先, 等. 柴达木盆地一里坪地区新近系盆地模拟及有利区预测[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 74-84.
- FENG Dehao, LIU Chenglin, TIAN Jixian, et al. Basin modeling and favorable play prediction of Neogene in Yiliping area, Qaidam Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(3): 74-84.
- [55] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2004: 15-39.
- SHI Guangren. Method for numerical simulation of oil and gas basins[M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 15-39.
- [56] KAUERAUF A I, HANTSCH T. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [57] 蒋有录, 苏圣民, 刘华, 等. 渤海湾盆地油气成藏期差异性及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1255-1264.
- JIANG Youlu, SU Shengmin, LIU Hua, et al. Differences in hydrocarbon accumulation stages and main controlling factors in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1255-1264.
- [58] WYGRALA B. Integrated study of an oil field in the southern Po Basin, northern Italy: Juel-2313[R]. Jülich; Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Verlag, 1989.
- [59] 彭波, 邹华耀. 渤海盆地现今岩石圈热结构及新生代构造-热演化史[J]. 现代地质, 2013, 27(6): 1399-1406.
- PENG Bo, ZOU Huayao. Present-day geothermal structure of lithosphere and the Cenozoic tectono-thermal evolution of Bohai Basin[J]. Geoscience, 2013, 27(6): 1399-1406.
- [60] 胡圣标, 张容燕, 罗毓晖, 等. 渤海盆地热历史及构造-热演化特征[J]. 地球物理学报, 1999, 42(6): 748-755.
- HU Shengbiao, ZHANG Rongyan, LUO Yuhui, et al. Thermal history and tectonic-thermal evolution of Bohai Basin, east China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(6): 748-755.
- [61] 王鑫, 蒋有录, 曹兰柱, 等. 富油凹陷洼槽区古压力演化特征及影响因素——以冀中坳陷饶阳凹陷为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 586-595.
- WANG Xin, JIANG Youlu, CAO Lanzhu, et al. Characteristics of paleopressure evolution and its influencing factors in sub-sags of hydrocarbon-bearing sag: A case study of Raoyang Sag in Jizhong Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 586-595.
- [62] 谢玉洪. 渤海湾盆地渤中凹陷太古界潜山气藏BZ19-6的气源条件与成藏模式[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 858-866.
- XIE Yuhong. Gas resources and accumulation model of BZ19-6 Archean buried-hill large-scale gas reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(5): 858-866.
- [63] 全志刚, 李友川, 何将启, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6大型凝析气田天然气来源探讨[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 324-330, 336.
- TONG Zhigang, LI Youchuan, HE Jiangqi, et al. Gas source of BZ19-6 condensate gas field in Bozhong Sag, Bohai Sea area[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(2): 324-330, 336.
- [64] 郝芳, 邹华耀, 龚再升, 等. 新(晚期)构造运动的物质、能量效应与油气成藏[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 424-431.
- HAO Fang, ZOU Huayao, GONG Zaisheng, et al. The material and energy effects of neotectonics/late-stage tectonics and petroleum accumulation[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 424-431.
- [65] 高长海, 孟士达, 查明, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷港北多层系潜山结构特征与成藏模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 36-45.
- GAO Changhai, MENG Shida, ZHA Ming, et al. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation models of Gangbei multi-layer buried hill in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(3): 36-45.
- [66] 薛永安, 李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 1-9.
- XUE Yongan, LI Huiyong. Large condensate gas field in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai Sea: Discovery and geological significance[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 1-9.
- [67] 王国强, 郭涛, 边立恩, 等. 复杂断块油田隐蔽断层精细识别——以渤中凹陷BZ油田为例[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(4): 1-6.
- WANG Guoqiang, GUO Tao, BIAN Lien, et al. Fine identification of hidden faults in complex fault block oilfields—by taking BZ Oilfield in west slope of Bozhong Sag as an example[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2022, 36(4): 1-6.

(编辑 张玉银)